

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-54411

(43) 公開日 平成11年(1999) 2月26日

(51) Int.Cl. ⁸	識別記号	F I	
H 0 1 L 21/027		H 0 1 L 21/30	5 1 5 D
G 0 2 B 5/30		G 0 2 B 5/30	
	13/24		13/24
G 0 3 F 7/20	5 2 1	G 0 3 F 7/20	5 2 1

審査請求 未請求 請求項の数10 F D (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願平9-218179

(22) 出願日 平成9年(1997) 7月29日

(71) 出願人 000001007

キヤノン株式会社

東京都大田区下丸子3丁目30番2号

(72) 発明者 畔野 靖行

東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤ
ノン株式会社内

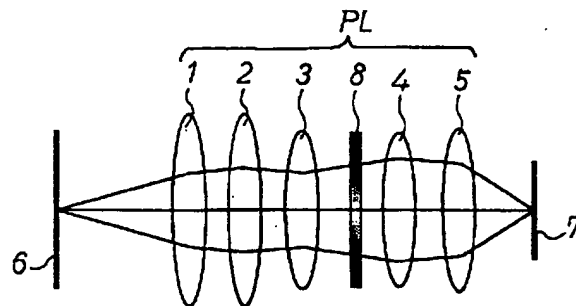
(74) 代理人 弁理士 高梨 幸雄

(54) 【発明の名称】 投影光学系及びそれを用いた投影露光装置

(57) 【要約】

【課題】 投影光学系に含まれる光学エレメントが有する複屈折性を補正し、高解像度のパターンが得られる投影光学系及びそれを用いた投影露光装置を得ること。

【解決手段】 第1物体のパターンを第2物体上に投影する投影光学系において、該投影光学系はそれに含まれる光学エレメントが有する複屈折性を補正する複屈折補正手段を有していること。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 第1物体のパターンを第2物体上に投影する投影光学系において、該投影光学系はそれに含まれる光学エレメントが有する複屈折性を補正する複屈折補正手段を有していることを特徴とする投影光学系。

【請求項2】 前記複屈折補正手段は所定の構造的複屈折を有する1つ又は複数の光学部材より成っていることを特徴とする請求項1の投影光学系。

【請求項3】 前記1つ又は複数の光学部材はそれより生じる構造的複屈折の分布を加えた分布が前記投影光学系を構成する光学エレメントから生じる複屈折性をキャンセルするように設定されていることを特徴とする請求項2の投影光学系。

【請求項4】 前記1つ又は複数の光学部材は使用波長より小さい周期から成る回折格子を利用して構造的複屈折を発生させていることを特徴とする請求項2又は3の投影光学系。

【請求項5】 前記回折格子は前記投影光学系に含まれる光学エレメントの表面に設けられていることを特徴とする請求項4の投影光学系。

【請求項6】 前記複屈折補正手段は所定の応力の分布を有する1つ又は複数の光学部材より成っていることを特徴とする請求項1の投影光学系。

【請求項7】 前記1つ又は複数の光学部材は、それより生じる応力の分布を加えた分布が前記投影光学系を構成する光学エレメントから生じる複屈折性をキャンセルするように設定されていることを特徴とする請求項6の投影光学系。

【請求項8】 照明系からの光束で照明した第1物体面上のパターンを請求項1から7のいずれか1項記載の投影光学系によって第2物体面上に投影露光していることを特徴とする投影露光装置。

【請求項9】 スリット開口の光束で第1物体面上のパターンを照明し、第1物体面上のパターンを請求項1から7のいずれか1項記載の投影光学系により可動ステージに載置した第2物体面上に該第1物体と該可動ステージを該スリット開口の短手方向に該投影光学系の投影倍率に対応させた速度比で同期させてスキャンさせながら投影露光していることを特徴とする投影露光装置。

【請求項10】 請求項1又は2記載の投影露光装置を用いてデバイスパターンを基板上にプリントする段階を含むことを特徴とするデバイスの製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は半導体素子、CCD、液晶デバイス等のデバイス製造用の投影光学系及びそれを用いた投影露光装置及びそれを用いたデバイスの製造方法に関するものであり、特に、ステップアンドリビート方式やステップアンドスキャン方式の投影露光装置（ステッパ）において投影光学系を構成する光学エレ

メント（硝材）が有する複屈折性の影響を補正し、高解像度のパターンを得る投影露光装置に好適なものである。

【0002】

【従来の技術】 最近、DRAM、CPU等の半導体素子の高集積化が顕著であり、最先端の素子（デバイス）においては $0.25\mu\text{m}$ 以下のサイズを有する回路パターンが必要とされている。そのような微細なパターンを高精度に形成することが可能な装置として、所謂ステッパが広く用いられる。ステッパにおいては、レチクル上のパターンを紫外領域の短波長光で照明し、投影光学系を介してシリコン等の半導体ウェハ上に縮小投影することにより、該ウェハ上に微細な回路パターンの形成を行っている。

【0003】 その際、レチクル上のパターンを高精度に転写するために、投影光学系に対しては様々な厳しい条件が課せられている。投影光学系が解像することが可能なパターンサイズはNA（開口数）に反比例するため、NAをより大きくするための設計が必要となる。更に半導体チップの面積に対応する領域全体で高度に収差が補正されている必要がある。

【0004】 そのような設計は、高速なコンピュータと専用の設計ソフトウェアを用いて実現される。その投影光学系を製造する際には、投影光学系を構成する1枚1枚のレンズを設計値通りに高精度に加工する必要があるのは当然であるが、用いる硝材に対しても細心の注意を払う必要がある。硝材が有する屈折率は投影光学系の結像特性に深く関わってくるため、その均一性は非常に厳密に管理され通常は 10^{-6} 以下のオーダーに抑えられている。更には硝材の複屈折性も結像特性に大きな影響を与えるため、その大きさは 2nm/cm 程度に抑える必要があることが知られている。

【0005】 しかしながら、最大で直径が 200mm にも達する投影光学系用の硝材において、全面一様にそのような高精度の複屈折性の制御を行うのは非常に困難であり、以下に述べる理由により、通常はある程度の複屈折性が発生してしまう。

【0006】 理由の第1は、硝材の製造工程に起因するものである。紫外領域の光に対してはレンズエレメント用の硝材として現在のところ石英ガラスが広く用いられるため、ここからの説明は石英ガラスを中心に行う。硝材として用いられる石英ガラスは、光学結晶等とは異なりその構造に方向性がないため、理想的な状態においては複屈折性は発生しない。

【0007】 しかしながら、石英ガラスにおいては、不純物、熱履歴などによる残存応力に起因すると考えられる複屈折性が実験的に観測される。リソグフィー用の高品質な石英ガラスの製造においては、ダイレクト法（Direct Method）、VAD（vapor axial deposition）法、ゾルゲル（sol-gel）法、プラズマバーナー（plasma burner）法、等が用いられるが、いずれの方法において

も、現状の技術で不純物の混入を無視できるレベルまで抑えるのは困難である。

【0008】また、高温の状態で形成された石英ガラスを冷却する際に、表面と中心部の冷え方が異なることによる発生する応力、即ち熱履歴による応力は、アニール等の熱処理によりある程度緩和することはできるものの、原理的に完全にゼロとすることが難しい。

【0009】次に図24を用いて、リソグフィーの際に投影光学系に用いられるレンズエレメントを作製する工程について説明する。まず石英ガラスのインゴット100が回転対称な形で形成され、それを必要な厚さで切断することによって円板状の部材101が得られる。インゴット100の製造は常に中心軸100aに関して対称な形で行われるため、部材101中に残存する不純物の分布、熱履歴による応力の分布も当然、中心軸101aに関して対称な形で現れる。最後に部材101に対して切削、研磨の加工を行うことによってレンズエレメント102が作られる。

【0010】ここで、インゴット100に不純物が混入した場合に現れる歪みについて説明する。図25はインゴット100の切断面を表し、周辺のハッチ部103で不純物濃度が高くなっているとする。インゴット100はアニリングの過程において加熱される。そして熱が加わった状態では内部応力がほぼ完全にゼロとなり、その状態からゆっくりと冷却することにより、理想的には室温においても内部応力ゼロの材料が作られる。ところが不純物が混入すると材料の熱膨張率が変化する。不純物が混入することにより熱膨張率が増大するとすると、当然その部分は、冷却の過程において縮み方が大きくなる。

【0011】そのため、加熱した状態で無応力だったものが、温度を下げることににより周辺部がより大きく縮もうとする。光束が透過する硝材の中央部に着目すれば、図25中で矢印で示すような圧縮を周辺部から受けることになり、内部応力が発生してしまう。内部応力は複屈折性が生じる原因となる。

【0012】理由の第2は、石英ガラスをステッパ中で使用する際の経時変化に起因するものである。石英ガラスに、KrF、ArFレーザ等の短波長光源からの光を照射すると、コンパクション (compaction) と呼ばれる現象が発生することが知られている。その発生過程の詳細に関する説明は省略するが、観察される現象としては、光束が透過した部分の屈折率が上昇し、体積が収縮するというものである。

【0013】図26中で円板状の硝材110に対して、斜線の領域111にレーザ光を照射すると、その部分の体積が収縮しようとする。レーザ光が照射されない周辺部はもちろんコンパクションの影響は受けないから、全体としては、中心付近は収縮しようとして周辺付近はその収縮を阻止しようとする。

【0014】そのため平衡状態においては、光束が透過

する硝材の中央部に着目すれば、図27中で矢印で示すような引っ張りの力を周辺部から受けることになり、内部応力が発生してしまう。内部応力は複屈折性が生じる原因となる。上記の現象は、ステッパの投影光学系においても同様に発生する。ArFレーザ光に対してコンパクションの発生は特に顕著になるため、今後、ArFレーザ光を光源とする投影露光装置を実用化する上で大きな問題となることが危惧されている。

【0015】

【発明が解決しようとする課題】以上説明したように、硝材で発生する複屈折性を完全にゼロに抑えることは現実的に難しい。それに対して、ステッパ用の投影光学系において複屈折に対する要求は益々厳しくなっている。より高性能の投影光学系を実現するために、投影光学系を構成するレンズエレメントの枚数は増える傾向にあり、トータルな硝材の厚さが大きくなる。そのため単位長さ当りの複屈折量を上述の値 (2nm/cm程度) に抑えたとしても、全体の複屈折量は無視し得ない大きさとなってしまう。また、露光光源用の波長が益々短くなってきていることも複屈折性の影響を増大させる方向に働く。

【0016】具体的に投影露光装置に使用されているi線光源 (波長365nm) と、ArFレーザ光源 (波長193nm) で比較してみる。例えば光学系全体で100nmの複屈折性があった場合、波長365nmのi線に対しては $100/365 = 0.27$ 波長分の波面収差に相当するが、波長193nmのArFレーザ光源に対しては $100/193 = 0.52$ 波長分の波面収差に相当し、同じ大きさの複屈折性を仮定しても、結像特性に与える影響は波長が短い程大きくなることが分かる。

【0017】中心対称な複屈折性を有する光学硝材については、レンズエレメント毎に異なる複屈折率量を有する硝材を用い、その組み合わせを最適化することによって光学特性への悪影響をある程度軽減できることが特開平8-107060号公報に記載されているが、そのような考え方では、もはや投影光学系に対する高精度化の要求に答えることができなくなっている。そのため、硝材が有する複屈折性そのものを、何らかの手段でキャンセルすることが必要になっている。

【0018】本発明は、投影光学系中に適切に設定した複屈折性を補正する複屈折補正部材を設けることにより、投影光学系の有する複屈折性及び投影露光を行っている過程において生じる複屈折性を良好に補正し、高精度なパターンの転写ができる投影光学系及びそれを用いた投影露光装置及びそれを用いたデバイスの製造方法の提供を目的とする。

【0019】

【課題を解決するための手段】本発明の投影光学系は、(1-1) 第1物体のパターンを第2物体上に投影する投影光学系において、該投影光学系はそれに含まれる光学エ

レメントが有する複屈折性を補正する複屈折補正手段を有していることを特徴としている。

【0020】特に、(1-1-1) 前記複屈折補正手段は所定の構造的複屈折を有する1つ又は複数の光学部材より成っていること。

【0021】(1-1-2) 前記1つ又は複数の光学部材はそれより生じる構造的複屈折の分布を加えた分布が前記投影光学系を構成する光学エレメントから生じる複屈折性をキャンセルするように設定されていること。

【0022】(1-1-3) 前記1つ又は複数の光学部材は使用波長のより小さい周期から成る回折格子を利用して構造的複屈折を発生させていること。

【0023】(1-1-4) 前記回折格子は前記投影光学系に含まれる光学エレメントの表面に設けられていること。

【0024】(1-1-5) 前記複屈折補正手段は所定の応力の分布を有する1つ又は複数の光学部材より成っていること。

【0025】(1-1-6) 前記1つ又は複数の光学部材は、それより生じる応力の分布を加えた分布が前記投影光学系を構成する光学エレメントから生じる複屈折性をキャンセルするように設定されていること。等を特徴としている。

【0026】本発明の投影露光装置は、(2-1) 照明系からの光束で照明した第1物体面上のパターンを構成(1-1)の投影光学系によって第2物体面上に投影露光していることを特徴としている。

【0027】(2-2) スリット開口の光束で第1物体面上のパターンを照明し、第1物体面上のパターンを構成(1-1)の投影光学系により可動ステージに載置した第2物体面上に該第1物体と該可動ステージを該スリット開口の短手方向に該投影光学系の投影倍率に対応させた速度比で同期させてスキャンさせながら投影露光していることを特徴としている。

【0028】本発明のデバイスの製造方法は、(3-1) 構成(2-1)又は(2-2)の投影露光装置を用いてデバイスパターンを基板上にプリントする段階を含むことを特徴としている。

【0029】

【発明の実施の形態】図1は、本発明の投影光学系の要部断面図である。本実施形態はステップアンドリピート方式又はステップアンドスキャン方式に適用可能なものである。同図においてPLは投影光学系であり、高精度に収差が補正された通常数十枚の光学エレメントによって構成されるが、それを簡略化して、レンズエレメント1～5で代表させて示している。

【0030】ここでレンズエレメント1～5は石英ガラスを切削、研磨することによって形成されている。該投影光学系PLが実際にステップに搭載された構成の詳細については後で説明する。6はレチクル、7はウェハである。レチクル6面上のパターンを投影光学系PLによ

ってウェハ7面上にステップアンドリピート方式又はステップアンドスキャン方式で縮小投影している。

【0031】図中、8は本発明に係る複屈折補正部材であり、その働きの詳細については後程説明する。

【0032】レンズエレメント1～5の材料となる石英ガラスにおいては、前述の通り、その製造工程において中心軸に関して対称な歪みの発生を完全に抑えることは難しい。或いは、ArFレーザー等の短波長光源と共に用いられる際には、コンパクションによる体積収縮の影響で歪みが発生する。そこで硝材にそのような歪みが発生した場合の影響について説明する。まず歪みにより発生する応力について図2を用いて説明する。

【0033】図2において10は石英ガラスのインゴットから所定の厚さ h で切り出された円板であり、レンズエレメントに加工される前段階の硝材を示している。11は円板10の中心軸を表している。また12のように x 、 y 、 z 座標軸を定める。この場合中心軸11に沿った方向(z 方向)の応力は無視できるから、図3に示すように xy 面内において極座標(r 、 θ)で表される点Pにおける半径方向の応力 σ_r 、円周方向の応力 σ_θ にのみ着目する。点Pの近傍で斜線で示す微小領域13について半径方向の力の釣り合いを考えると、 $-\sigma_r \cdot r d\theta + (\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr) d\theta - \sigma_\theta \cdot d\theta \cdot dr = 0$ の関係が得られ、高次の微量を省略してまとめると $\sigma_\theta - \sigma_r = r(d\sigma_r/dr) \dots (1)$ が得られる。

【0034】硝材10に残存する歪みは半径方向で変化するため、応力 σ_r の半径 r による微分は一般にゼロとはならない。そのため式(1)式の右辺は $r \neq 0$ (中心軸上以外)ではゼロでない有限の値を有し、このことは、中心軸11上以外では半径方向 r の応力 σ_r と円周方向の応力 σ_θ が異なる値を有することを意味している。

【0035】その際、光学的に観測される影響を図4、図5により説明する。図4に示すように、点P(r 、 θ)の位置に、波長 λ で y 方向に直線偏光した光束が入射するとする。ここで直線偏光の偏光方向を矢印14で表す。この入射光が円板10を透過する際には、その半径方向の偏光成分15と円周方向の偏光成分16で異なる屈折率を感じるようになる。その結果、円板10を透過後には図5に示すように、2つの偏光成分間で位相差 Φ が発生し、光束の偏光状態は直線偏光から楕円偏光に変換されてしまう。ここに位相差 Φ は、応力 σ_r 、 σ_θ を用いて $\Phi(r) = (2\pi/\lambda) C \cdot h \{ \sigma_\theta(r) - \sigma_r(r) \} \dots (2)$ と表される。

【0036】 C は光弾性定数と呼ばれ物質に固有の値である。このように円板状の硝材10を光束が透過すると、その偏光状態が変化してしまう。硝材1枚1枚における影響はもちろん微々たるものであるが、数十枚のエレメントを透過した後には投影光学系の結像特性として無視

しえない悪影響を与える。実際の投影光学系において、それぞれのエレメントで(2)式の影響を考え、投影光学系全体で複屈折性による位相変化の量を加え合わせると図6のようになることが分かっている。

【0037】ここで横軸は、レンズエレメントの半径 r の代わりに光学系の瞳座標 ρ で表している。瞳座標については図7を用いて説明する。図中17、18はレンズエレメントである。レンズエレメント17、18を通過する光線19に着目すると、その位置を指定するためにはレンズエレメント17においては中心軸(光軸)20から測った半径 r_1 、レンズエレメント18においては中心軸20から測った半径 r_2 といったように複数のパラメータが必要となり不便である。

【0038】そこで光学系全体の瞳位置21に着目し、そこを光線19が通過する高さ瞳座標 ρ で光線19を指定することにすれば、一つのパラメータで光学系の特性が表されることになる。そこで ρ を瞳座標として光学系を透過する光束の位置を規定するものとして、その最大値は ρ_0 であるとする。

【0039】図6に示した結果は、実際に組み立てられた光学系を用いて、位相変調法等の手段を用いて実験的に計測されるものである。但し精度をある程度犠牲にすればシミュレーションによって計算することも可能である。位相変調法に関しては、持田悦宏 著：光技術コンタクト vol. 27, No. 3 (1989)等に詳細な解説が記載されている。このため、ここでの説明は省略するが、非常に感度が高く、複屈折性による屈折率差 Δn の値で 10^{-8} の精度の測定が可能であり、また進相軸、遅相軸を同時に決定できるという利点も有する。

【0040】進相軸、遅相軸が分かると、図6における $\Phi(\rho)$ の符号を直接的に決定することができる。ともかく図6の意味するところは、光学系の中心($\rho=0$)を透過する光束については複屈折性による位相変化量はゼロであるが、周辺部($\rho=\rho_0$)を透過する光束に対しては複屈折性による位相変化量が $\pi/4$ にも達してしまうということである。

【0041】結像特性に与える影響について理論式を用いた詳細な説明は割愛するが、現象としては光学系において $\lambda/4$ 程度の大きさを持った非点収差が現れることになる。ステッパ用の投影光学系に許容される収差は $\lambda/100$ のオーダーのものであり、上記のように大きな収差は到底許容しえない。

【0042】そこで本発明では、図1において光学系中に複屈折補正部材8を用いることによって、図6に示したような位相変化分をキャンセルするようにしている。光軸対称に発生した複屈折をキャンセルするには、光軸対称に逆符号の複屈折性を有する部材を用いればよいことは明らかである。但しその複屈折量の大きさは、投影光学系PL全体で生じた複屈折量と同程度のものでな

ければならない。

【0043】ここで複屈折補正部材8の具体的な構成について説明する。この複屈折補正部材の材質としては、露光光に対して透明で、かつ十分な耐久性を持っていないといけないという要請から、レンズエレメント1〜5に用いられる光学ガラスと同等のものである必要がある。そのような光学ガラスに対して所定の分布を有する複屈折性を発生させるために、ここでは構造的複屈折(form birefringence)という現象を利用する。

【0044】そこでまず構造的複屈折について図8を用いて説明する。図中、25は光学ガラスの表面に形成された位相型の回折格子を表している。回折格子25は右側に示す拡大図にも示す通り、周期： b 、深さ： d であり、微細格子を形成する光学ガラスの部分の幅が a である。ここで今後の議論に用いるため、デューティ比 t を $t=a/b$ で定義しておく。26はこのような回折格子25に対して入射する入射光束(波長： λ)を表し、27は回折格子から射出する射出光束を表す。

【0045】また28は入射光束26に関して、回折格子25の溝と平行な方向の偏光成分29は、回折格子25の溝と垂直な方向の偏光成分を表す。同様に30は射出光27に関して、回折格子25の溝と平行な方向の偏光成分を表し、31は回折格子25の溝と垂直な方向の偏光成分を表す。

【0046】ここで回折格子25の周期 b としては、射出光27として0次以外の回折光が発生しないようにするため、“ b は λ 以下である”ことが要請される。

【0047】図8では、入射光26においては偏光成分28、29の間で位相差が存在しなかったものが、回折格子25を透過することで、偏光成分30と31の間に位相差 Ψ が発生していることを表している。そのため、入射光26が直線偏光であるとする、射出光27は楕円偏光に変換されてしまうことが理解できる。このような現象は構造的複屈折(form birefringence)と呼ばれており、光学の分野では古くから知られている。

【0048】例えば、「M. Born and E. Wolf : Principles of Optics, 1st ed. (Pergamon Press, New York, 1959) pp.705-708」、「青山 他：“微細回折格子を用いた複屈折素子とその応用”、光学 Vol.21, No.5, p.269-274 (1992)」等には詳しい解説が記載されている。以下、それらの内容を要約して説明を行う。

【0049】まず図8に示すような微細な回折格子25においては、入射光束26の偏光方向によって異なる屈折率を示す。入射光26の偏光が回折格子25の溝に平行である場合の屈折率 n_{\parallel} 、入射光26の偏光が回折格子25の溝に垂直 n_{\perp} はそれぞれ次のように表される。

【0050】

【数1】

$$n_{II} = \sqrt{t n_1^2 + (1-t) n_2^2} \quad \dots (3)$$

$$n_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{\frac{t}{n_1^2} + \frac{1-t}{n_2^2}}} \quad \dots (4)$$

ここで t は上で定義したデューティー比であり、 n_1 は回折格子25を構成する部材の屈折率、 n_2 は光束が入射する側の媒質の屈折率である。 $n_1 = 1.6$ 、 $n_2 = 1.0$ として、 n_{II} 及び n_{\perp} の t に対する依存性を計算した結果を図9に示す。また、回折格子25の溝の深さを d とした際に、回折格子25の溝に平行な偏光成分と回折格子の溝に垂直な偏光成分間に現れる位相差 Ψ は【0051】

【数2】

$$\Psi = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_{II} - n_{\perp}) \quad \dots (5)$$

によって与えられる。

【0052】式(3)～(5)から、デューティー比 t および溝の深さ d を適当に選択することで、位相差 Ψ を任意の値に設定可能なことが分かる。

【0053】次に、複屈折補正部材8を図7の投影光学系PLの瞳位置21に挿入するとして、その具体的な構成の説明を行う。説明には図10を用いる。

【0054】図10は、図1に示した投影光学系において、瞳半径 ρ で指定される光束がレンズエレメント1～5及び複屈折補正部材8を透過する際の、半径方向の偏光成分、円周方向の偏光成分間の位相差の関係を説明するためのものである。硝材において光軸に関して対称な複屈折性を仮定すると、入射光の半径方向の偏光成分と円周方向の偏光成分の間に位相差が発生してしまうことは図4及び図5を用いて説明した通りである。

【0055】図10において41～44は半径方向の偏光成分であり、45～48は円周方向の偏光成分を表す。両者間の位相差は、光束40がレンズエレメント1に入射する前は当然ゼロである。

【0056】ここでの際、投影光学系全体としては、各レンズエレメント1～5に発生した複屈折性によって、瞳半径座標 ρ の関数として図6に示す位相差 $\Phi(\rho)$ が生じているとする。更に $\Phi(\rho)$ を $\Phi(\rho) = \Phi_1(\rho) + \Phi_2(\rho)$ に従って分解し、位相差 $\Phi_1(\rho)$ をレンズエレメント1～3によって発生する位相差、位相差 $\Phi_2(\rho)$ をレンズエレメント4～5によって発生する位相差とする。

【0057】また複屈折補正部材8においては、瞳座標 ρ の関数として半径方向と円周方向の偏光成分間の位相差 $\Psi(\rho)$ が生じると仮定する。そうすると、複屈折補正部材8に入射する直前の光束には、半径方向と円周方

向の偏光成分の間の位相差は $\Phi_1(\rho)$ で与えられ、複屈折補正部材8を透過した直後の位相差は $\Phi_1(\rho) + \Psi(\rho)$ 、更にレンズエレメント4～5を透過した後の位相差は $\Phi_1(\rho) + \Phi_2(\rho) + \Psi(\rho) = \Phi(\rho) + \Psi(\rho)$ ……(6)によって与えられる。

【0058】本発明の本質は、式(6)をゼロとするような位相差関数 $\Psi(\rho)$ を与えることが可能な複屈折性を有する部材を光路中に挿入することである。

【0059】図6と合わせて考えると、式(6)をゼロとする位相差関数 $\Psi(\rho)$ は図11に示すものとなることは明らかである。即ち、位相差 $\Phi(\rho)$ とは符号が逆で絶対値が等しいものである。

【0060】前に説明したように、構造的複屈折を示す微細な回折格子25を用いてそのデューティー比 t および溝の深さ d を適当に選択することで、回折格子の溝に平行な方向の偏光成分と回折格子の溝に垂直な方向な偏光成分の間の位相差を任意の値に設定することができる。

【0061】そこで、複屈折補正部材8においては、その表面に、光軸に関して対称となるように微細な回折格子を形成する。その場合、図12に示すように回折格子25を光軸に関して同心円状に配置する構成と、図13に示すように回折格子25を光軸に関して放射状に配置する構成が可能である。

【0062】構造的複屈折を生じさせるために必要な微細回折格子の周期には、前にも述べた通り波長 λ 以下であるという条件のみが必要であるが、あまり小さい周期では製造が困難になる。そこで回折格子の周期としては $\lambda/3 \sim \lambda$ の範囲に収まっていることが望ましい。そのため回折格子を光軸に関して放射状に配置する構成では、図13に示すように半径方向を複数の領域に分割し、それぞれの領域内部での周期が上記の範囲に収まるようにしている。

【0063】図12と図13に示した構造による機能の違いは以下のように説明される。図12において点Pに入射する光束について、半径方向の偏光成分50と円周方向の偏光成分51の間では、部材8を透過することにより、半径方向の偏光成分50の位相に対して円周方向の偏光成分51の位相を相対的に遅らせることができる。一方図13の構造において同様に考えると、半径方向の偏光成分52の位相に対して円周方向の偏光成分53の位相を相対的に進ませることができる。即ち、投影光学系で発生する複屈折性の符号に応じて両者を使い分けることがで

きる。ここで図11に示した位相差 $\Psi(\rho)$ を発生させるには図13の構造を適用すればよい。

【0064】ところで位相の補正量は、当然、半径方向で変化させる必要がある。そのためには、微細回折格子のデューティー比、或いは溝の深さを半径方向で変化させればよい。但しデューティー比を連続的に変化させることは製造上非常に困難なので、ここでは溝の深さを变化させる構成を図14を用いて説明する。位相補正量は図11からも明らかなように光学系の光軸上ではゼロである。そのため図14に示すように、微細回折格子の溝の深さとしては中心軸近傍ではゼロ、そして周辺にいくに従って深くなる構造とすればよい。

【0065】複屈折補正部材8が挿入される位置としては、投影光学系の瞳位置近傍であることが望ましいが、必ずしもそこに限られるものではない。また複屈折補正部材として、本実施例では平行平板のものをを用いて説明を行ったが、その形状は平行平板に限られるものではなく、通常のレンズエレメントのように凸面、または凹面の形状を有していても構わない。

【0066】図15(A)は、凸面上に、中心軸に関して同心円状に微細回折格子を構成した例であり、図15(B)は、凸面上に、中心軸に関して放射状に微細回折格子を構成した例である。更に本実施形態では、複屈折補正部材が1枚の光学素子で構成される場合について説明を行ったが、複数の部材で複屈折性の補正量を分担するようにしてもよい。

【0067】その際には、投影光学系に発生する、より大きな複屈折性、あるいは、より複雑な分布を有する複屈折性の補正を行うことが可能となる。

【0068】図16は本発明の投影光学系をステッパに搭載した実施形態2の要部概略図である。同図において60は回路パターンの描かれたレチクルであり、61は本発明に係る投影光学系、62は該回路パターンが転写されるウェハである。照明系67からの照明光束63はレチクル60上の照明領域64を照明し、その領域64に描かれている回路パターンが、投影光学系61を介して、ウェハ62上の露光領域65に縮小転写される。ステッパにおいては、レチクル60上のパターンがウェハ62上に一括して縮小転写された後は、ウェハ62は所定の量だけステップして再び露光を行うということを繰り返す。

【0069】図中66は複屈折補正部材であり、投影光学系61が有する複屈折量に応じてその補正量を調整できるように、複屈折補正部材66自体が取り外し、交換可能になっていることが特徴である。

【0070】図17は本発明の投影光学系をステップ&スキャン型の露光装置に搭載した実施形態3の要部概略図である。同図において70は回路パターンの描かれたレチクルであり、71は投影光学系、72が該回路パターンが転写されるウェハである。照明系67からの照明光束73はレチクル70上の照明領域74を照明し、その領域74に

描かれている回路パターンが、投影光学系71を介して、ウェハ72上の露光領域75に縮小転写される。ステップ&スキャン型の露光装置は以下の点で従来のステッパとは異なる。

【0071】ステッパにおいては、レチクル70上のパターンをウェハ72上に一括して縮小転写していたが、ステップ&スキャン型の露光装置ではスリット形状の照明領域74で回路パターンを照明し、レチクル70、ウェハ72を同期をとってスキャンすることによりレチクル70上の回路パターン全体を縮小転写するようにしている。

【0072】座標系を76で表すと、レチクル70のスキャン方向77はx軸負の方向、ウェハ72のスキャン方向78はx軸正の方向となる。図中79は複屈折補正部材であり、ステッパの場合と同様に取り外し、交換可能になっていることが特徴である。

【0073】ステップ&スキャン型の露光装置においては、その照明領域74がスリット形状であるため、例えばArFレーザ光で照明を行った場合のコンパクションの影響が光軸に関して対称に現れなくなる。

【0074】次に図18を用いて、投影光学系71中のレンズエレメントにおける光の透過領域を説明する。図中、80は代表的なレンズエレメントであり、xy面内で表している(81は座標軸である)。

【0075】ここで図17に示す照明領域74の形状に対応して、レンズエレメント80においても、光束の透過する領域は斜線82で示すようにy軸方向に長く延びた形状となる。そのためコンパクションによる歪みもその形状に対応して発生する。その結果として発生する光学系の複屈折性も、当然、光軸に関して非対称となる。

【0076】図6果用いたのと同様の瞳座標を用いて表すと、複屈折による位相変化量は図19に示すようになる。即ち、x軸方向とy軸方向で異なった分布を有する。このような複屈折量の分布を補正するためには、図14で説明した溝の深さの分布をx軸方向とy軸方向で異ならせることにより対応することが可能である。

【0077】次に本発明に係る複屈折部材の実施形態2について説明する。図1～図8の実施形態1では複屈折補正部材8の具体的な構成として、複屈折補正部材の材質が、露光光に対して透明で、かつ十分な耐久性を持っていなければならないという要請から、レンズエレメント1～5に用いられる光学ガラスと同等のものを、複屈折性を発生させる為に構造的複屈折という現象を利用した場合を示した。

【0078】これに対して本実施形態では実施形態1に比べて光学ガラスの製造時に歪みが残留し、その影響で複屈折性が現れることはこれまで説明してきた通りであるが、ここでは、光学ガラスに対して積極的に歪みを与え、所望の複屈折性を発生させている。この点が実施形態1と異なっているだけであり、その他の構成及びその利用形態は基本的に同じである。

【0079】光学ガラスに歪みを残留させるためには、アニーリングの過程で温度の制御を精密に行うことで実現される。通常アニーリングと言えば光学ガラスに残留した歪みを取り除くために行われるものであるが、本発明に係る複屈折補正部材の生成においては、逆に残留歪みを発生させるためにアニーリングの過程を用いる。

【0080】アニーリングの過程について図20を用いて説明する。図中130が複屈折補正部材8の元となる光学部材である。光学部材130は円板状の形状を有しており中心軸131からの距離 r で部材上の位置が指定される。

【0081】図20(A)はアニーリング過程における加熱前の状態であり、図20(B)は光学部材130全体に一樣に熱が加えられた状態を表す。この状態では光学部材130の内部にはほとんど応力分布は存在していないが、次の図20(C)及び図20(D)に示す冷却の過程で大きな応力分布を発生させることができる。図20(C)においては中心付近に気体を吹き付けて急冷することにより、光学部材130が室温に戻った後、内部には大きな残留応力が発生している。その応力分布を図20(E)に示す。

【0082】半径方向 r の応力 σ_r と円周方向の応力 σ_θ をそれぞれ半径 r の関数として示すが、中心ではそれらが一致し、半径 r が大きくなるに従って両者の差が大きくなることが分かる。このような応力差の存在する物体を光路中に挿入すると、式(2)から計算される位相差が発生する。

【0083】ここで光学部材に発生させる応力分布は、図6に示す投影光学系全体が有する複屈折性による位相差を打ち消す値となるように調整される。そのためには、吹き付ける気体の温度、吹き付ける位置、気体吹き付け後の温度管理を厳密に行う必要があるが、それらに対しては実験を繰り返すことにより最適な条件が見出される。一例として、図20(D)のように気体を周辺部に吹き付けて急冷することにより図20(F)に示すような応力分布が得られる。

【0084】複屈折補正部材8に残留応力を発生させる方法として、アニーリング過程の温度分布を制御する代わりに、光学部材130中での不純物濃度を半径方向で変化させても同様の効果を実現することが可能である。更には、円板状の硝材、あるいはレンズエレメントに対して、外部から力学的な圧力を加えることによって所望の内部応力分布を持たせることももちろん可能である。

【0085】図17に示すステップアンドスキャン型の露光装置では投影光学系で光軸に対する非対称の複屈折が生ずる。このような露光装置に本実施形態の複屈折補正板を用いて非対称の複屈折生を補正する方法を図21を用いて説明する。

【0086】ここでは図20で説明したものと同様に、アニーリング時の温度分布を制御することによって補正

部材の複屈折性の調整を行う。図21において163は、アニーリング過程において全体に一樣に熱が加えられた状態を表し、164は x 方向と y 方向で異なる温度分布を持たせて冷却させた後の状態を表す。この状態において部材中の残留歪みは x 方向と y 方向で異なる分布を有しており、このような部材を投影光学系中に挿入することにより、光学系の光軸に関して非対称に発生した複屈折性の影響を補正している。

【0087】次に上記説明した投影露光装置を利用した半導体デバイスの製造方法の実施形態を説明する。

【0088】図22は半導体デバイス(ICやLSI等の半導体チップ、或いは液晶パネルやCCD等)の製造のフローを示す。

【0089】ステップ1(回路設計)では半導体デバイスの回路設計を行なう。ステップ2(マスク製作)では設計した回路パターンを形成したマスクを製作する。

【0090】一方、ステップ3(ウエハ製造)ではシリコン等の材料を用いてウエハを製造する。ステップ4(ウエハプロセス)は前工程と呼ばれ、前記用意したマスクとウエハを用いてリソグラフィ技術によってウエハ上に実際の回路を形成する。

【0091】次のステップ5(組立)は後工程と呼ばれ、ステップ4によって作製されたウエハを用いて半導体チップ化する工程であり、アセンブリ工程(ダイシング、ボンディング)、パッケージング工程(チップ封入)等の工程を含む。

【0092】ステップ6(検査)ではステップ5で作製された半導体デバイスの動作確認テスト、耐久性テスト等の検査を行なう。こうした工程を経て半導体デバイスが完成し、これが出荷(ステップ7)される。

【0093】図23は上記ウエハプロセスの詳細なフローを示す。ステップ11(酸化)ではウエハの表面を酸化させる。ステップ12(CVD)ではウエハ表面に絶縁膜を形成する。

【0094】ステップ13(電極形成)ではウエハ上に電極を蒸着によって形成する。ステップ14(イオン打ち込み)ではウエハにイオンを打ち込む。ステップ15(レジスト処理)ではウエハに感光剤を塗布する。ステップ16(露光)では前記説明した露光装置によってマスクの回路パターンをウエハに焼付露光する。

【0095】ステップ17(現像)では露光したウエハを現像する。ステップ18(エッチング)では現像したレジスト以外の部分を削り取る。ステップ19(レジスト剥離)ではエッチングがすんで不要となったレジストを取り除く。これらのステップを繰り返して行なうことによってウエハ上に多重に回路パターンが形成される。

【0096】本実施形態の製造方法を用いれば、従来は製造が難しかった高集積度の半導体デバイスを容易に製造することができる。

【0097】

【発明の効果】本発明によれば以上のように、投影光学系中に適切に設定した複屈折性を補正する複屈折補正部材を設けることにより、投影光学系の有する複屈折性及び投影露光を行っている過程において生じる複屈折性を良好に補正し、高精度なパターン転写ができる投影光学系及びそれを用いた投影露光装置及びそれを用いたデバイスの製造方法を達成することができる。

【0098】特に本発明によれば、投影光学系を構成する硝材に複屈折性が生じている場合でも、その影響を補正して高精度なパターン転写を行うことが可能となる。また、硝材がArFレーザ光等を吸収することによって発生するコンパクションによる歪みの影響も補正することが可能となる等の効果が得られる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施形態1の投影光学系の断面を表す概略図

【図2】光学エレメントの残留歪みの影響を説明するための図

【図3】光学エレメントの残留歪みの影響を説明するための図

【図4】光学エレメントの複屈折性の影響を説明するための図

【図5】光学エレメントの複屈折性の影響を説明するための図

【図6】本発明に係る硝材の複屈折性により発生する位相差を説明するための図

【図7】光学系の瞳座標を説明するための図

【図8】本発明に係る複屈折補正手段の実施形態1の構造的複屈折を説明するための図

【図9】偏光の向きによる屈折率の違いを説明するための図

【図10】本発明に係る複屈折による位相変化を説明するための図

【図11】複屈折補正部材で発生させる位相変化量の分布

【図12】本発明に係る構造的複屈折を利用した複屈折補正部材の説明図

【図13】本発明に係る構造的複屈折を利用した複屈折

補正部材の説明図

【図14】本発明に係る微細回折格子の深さ分布を説明するための図

【図15】本発明に係る凸面上に形成した微細回折格子

【図16】本発明の実施形態2のステップの要部概略図

【図17】本発明の実施形態3のステップ&スキャン型の投影露光装置の要部概略図

【図18】本発明の実施形態3のステップ&スキャン型の投影露光装置で発生する非対称歪み分布を説明するための図

【図19】本発明の実施形態3のステップ&スキャン型の露光装置で発生する非対称歪み分布を説明するための図

【図20】本発明に係る複屈折補正手段の実施形態2の要部概略図

【図21】本発明に係る複屈折補正手段の実施形態2の説明図

【図22】本発明のデバイスの製造方法のフローチャート

【図23】本発明のデバイスの製造方法のフローチャート

【図24】レンズエレメントの製造工程を説明するための図

【図25】不純物の影響で発生する内部歪みについて説明するための図

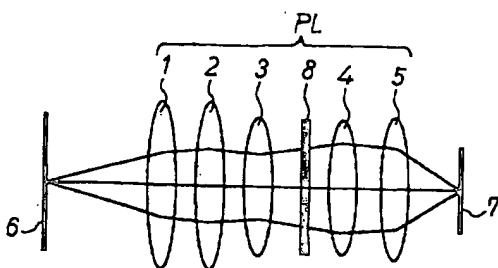
【図26】コンパクションの発生を説明するための図

【図27】コンパクションの影響で発生する内部歪みについて説明するための図

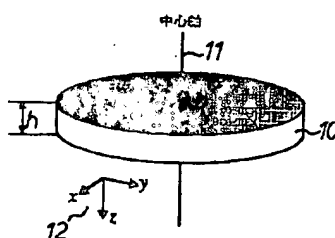
【符号の説明】

1～5	光学エレメント
6	第1物体（レチクル）
7	第2物体（ウエハ）
8, 164	複屈折補正手段
10	石英ガラス
11	中心軸
25	回折格子
130	光学部材
PL	投影光学系

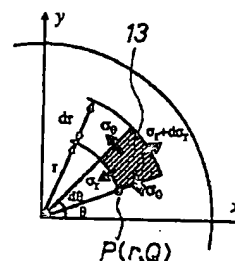
【図1】



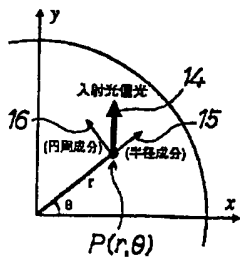
【図2】



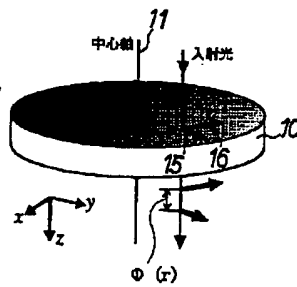
【図3】



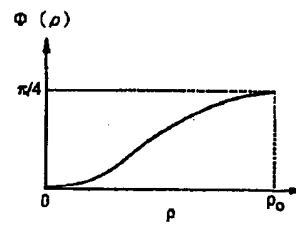
【図4】



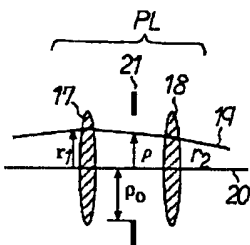
【図5】



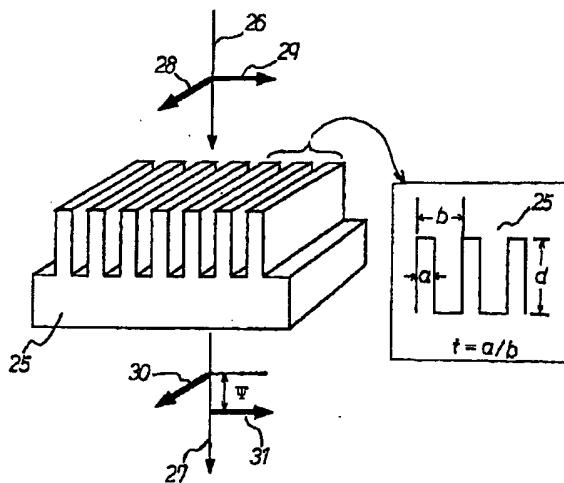
【図6】



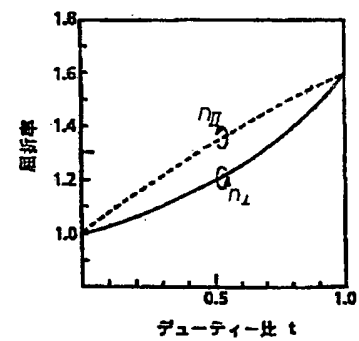
【図7】



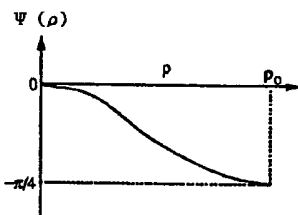
【図8】



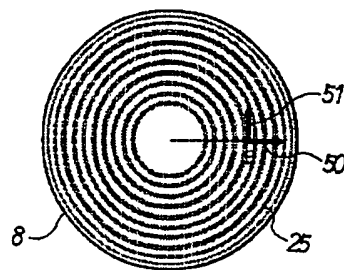
【図9】



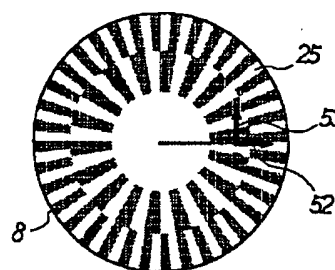
【図11】



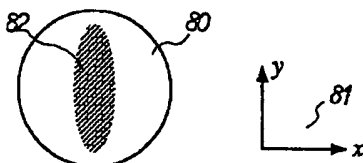
【図12】



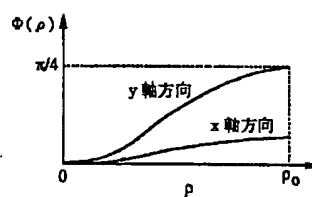
【図13】



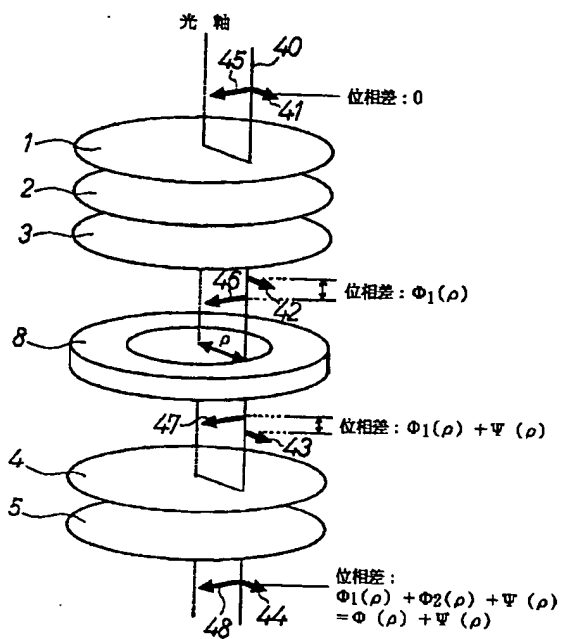
【図18】



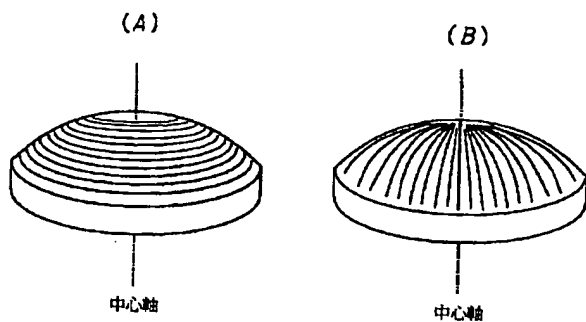
【図19】



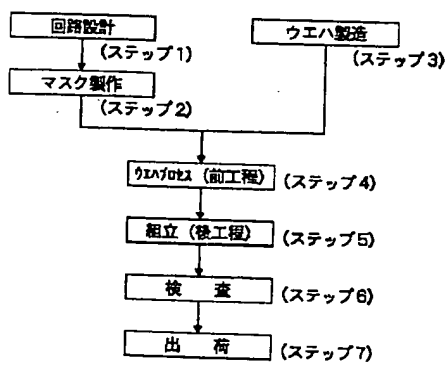
【図10】



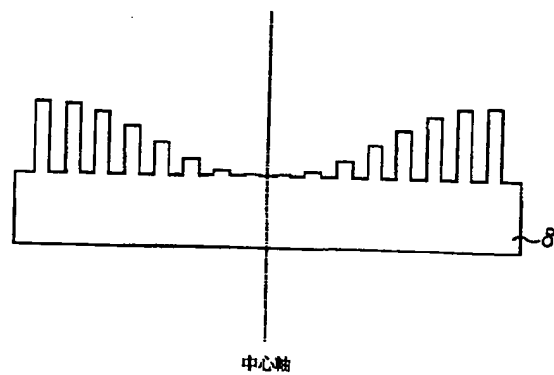
【図15】



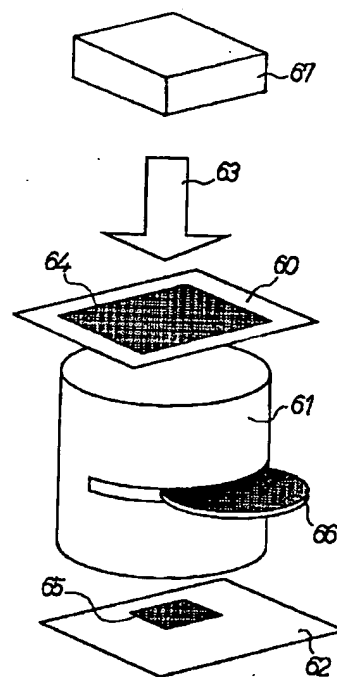
【図22】



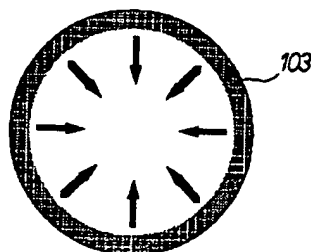
【図14】



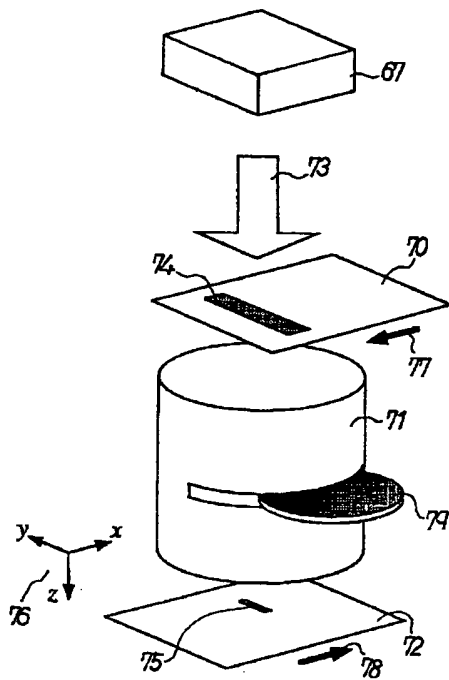
【図16】



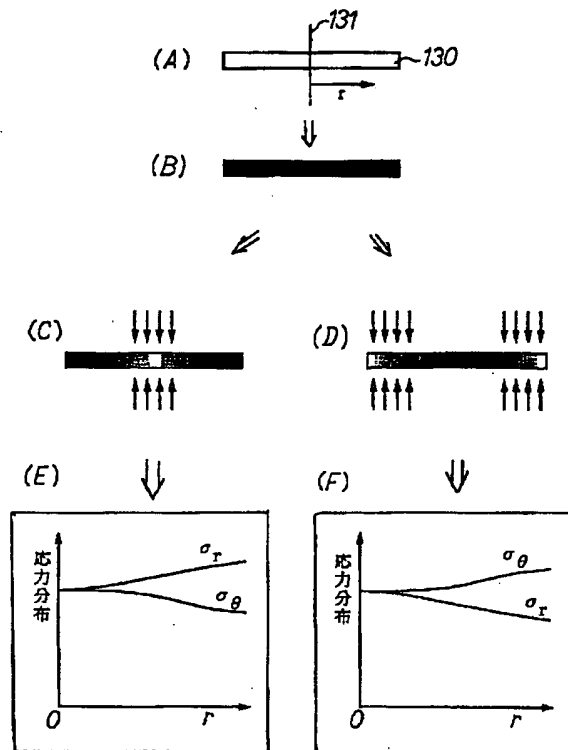
【図25】



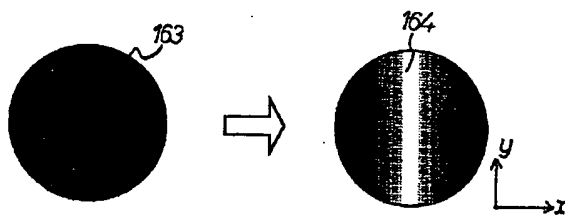
【図17】



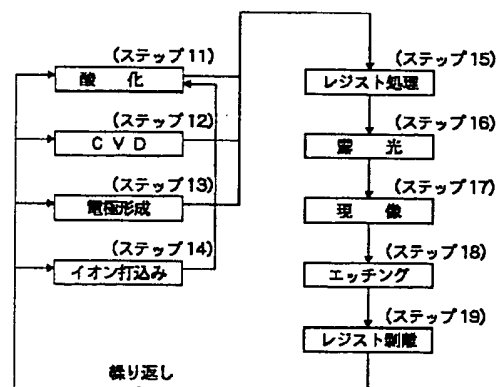
【図20】



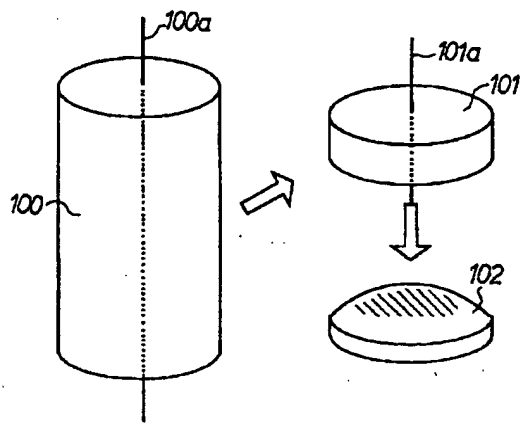
【図21】



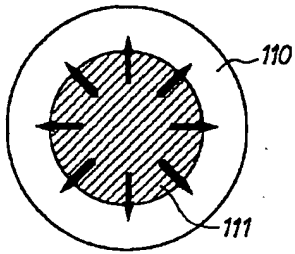
【図23】



【図24】



【図27】



【図26】

